
APPROXIMATION FORTE EN FAMILLE

par

Jean-Louis Colliot-Thélène & David Harari

Résumé. — Soient k un corps de nombres et X une k -variété affine lisse intègre fibrée au-dessus de la droite affine \mathbb{A}_k^1 . Supposons que toutes les fibres sont géométriquement intègres, et que la fibre générique est un espace homogène sous un groupe semisimple simplement connexe presque simple $G/k(t)$, les stabilisateurs géométriques étant réductifs connexes. Soit v une place de k telle que la fibration $X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ admette une section rationnelle sur le complété k_v . Supposons en outre que pour presque tout point $x \in \mathbb{A}^1(k_v)$ le k_v -groupe G_x soit isotrope. Supposons enfin le groupe de Brauer de X réduit à celui de k . Alors l'approximation forte vaut pour X en dehors de la place v .

Abstract. — Let k be a number field and X a smooth integral affine variety equipped with a surjective morphism $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ to the affine line. Assume that all fibres of f are split, for instance that they are geometrically integral. Assume that the generic fibre of f is a homogeneous space of a simply connected, almost simple, semisimple group $G/k(t)$, and that the geometric stabilizers are connected reductive groups. Let v be a place of k such that the fibration f acquires a rational section over the completion k_v at v . Assume moreover that at almost all points in $x \in \mathbb{A}^1(k_v)$ the specialized group G_x is isotropic over k_v . If the Brauer group of X is reduced to the Brauer group of k , then strong approximation holds for X away from the place v .

1. Introduction

Dans [13], Fei Xu et le premier auteur ont étudié l'approximation forte pour certains modèles lisses X des variétés définies sur un corps de nombres k par

une équation

$$q(x, y, z) = p(t),$$

où $q(x, y, z)$ est une forme quadratique non dégénérée à coefficients dans un corps de nombres k et $p(t) \in k[t]$ est un polynôme non nul en une variable. S’il existe une place v_0 telle que $q(x, y, z)$ est isotrope sur le complété k_{v_0} , on a établi que l’image diagonale de $X(k)$ dans la projection de l’ensemble de Brauer–Manin $X(\mathbb{A}_k)^{\text{Br}X}$ sur $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$ (adèles hors de v_0) est dense.

Un tel énoncé donne un énoncé local-global pour l’existence de points entiers, un résultat d’approximation forte lorsque par exemple $\text{Br}X/\text{Br}k = 0$, et dans le cas général une variante “Brauer–Manin” de l’approximation forte.

Dans le présent article, nous établissons un résultat général du même type pour des familles à un paramètre d’espaces homogènes.

Nous montrons :

Théorème A (voir le théorème 3.4) *Soit X une k -variété lisse connexe munie d’un morphisme $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ satisfaisant les conditions suivantes :*

- (i) *la fibre générique de f est un espace homogène d’un $k(t)$ -groupe semisimple simplement connexe presque simple G_t , et les stabilisateurs géométriques pour cette action sont réductifs connexes ;*
- (ii) *les fibres de f sont scindées, par exemple géométriquement intègres ;*
- (iii) *il existe une place v_0 telle que la fibration f ait une section rationnelle sur k_{v_0} , et que, pour presque tout $t_0 \in k_{v_0}$ le groupe spécialisé G_{t_0} est isotrope.*

Alors, sous l’hypothèse supplémentaire que les éléments du groupe de Brauer $\text{Br}X$ prennent une valeur constante lorsqu’on les évalue sur $X(k_{v_0})$, l’image diagonale de $X(k)$ dans la projection de l’ensemble de Brauer–Manin $X(\mathbb{A}_k)^{\text{Br}X}$ sur $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$ (adèles hors de v_0) est dense.

Sous les hypothèses générales du théorème, le quotient $\text{Br}X/\text{Br}k$ est fini.

L’hypothèse supplémentaire est requise par notre démonstration, nous ne savons pas si elle est en général nécessaire. Nous pouvons nous en passer dans le cas suivant, qui représente déjà une vaste généralisation des principaux résultats de [13].

Théorème B (théorème 4.2) *Soient $a_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, et $p(t)$ des polynômes deux à deux premiers entre eux. Soit $X \subset \mathbb{A}_k^4$ l’ouvert de lissité de la k -variété affine Y d’équation*

$$\sum_{i=0}^2 a_i(t)x_i^2 = p(t).$$

Soit v_0 une place de k .

(i) Si la conique d'équation $\sum_{i=0}^2 a_i(t)x_i^2 = 0$ sur le corps $k(t)$ a un point rationnel sur le corps $k_{v_0}(t)$, alors l'image diagonale de $X(k)$ dans la projection de l'ensemble de Brauer–Manin $X(\mathbb{A}_k)^{\text{Br}X}$ sur $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$ (adèles hors de v_0) est dense.

(ii) Si de plus le produit $p(t) \cdot \prod_i a_i(t)$ est un polynôme non constant séparable, alors $X = Y$ et l'approximation forte vaut pour X hors de v_0 : l'image diagonale de $X(k)$ est dense dans $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$.

À titre d'illustration, voici un cas particulier.

Théorème C Soient $a_i(t)$, $i = 1, 2, 3$, et $p(t)$ dans $\mathbb{Z}[t]$ des polynômes. Supposons le produit $p(t) \cdot \prod_i a_i(t)$ non constant et sans facteur carré dans $\mathbb{Q}[t]$. Soit \mathcal{X}/\mathbb{Z} le schéma affine défini dans $\mathbb{A}_{\mathbb{Z}}^4$ par

$$\sum_{i=0}^2 a_i(t)x_i^2 = p(t).$$

Supposons que pour presque tout $t \in \mathbb{R}$ la conique $\sum_{i=0}^2 a_i(t)x_i^2 = 0$ a un point dans \mathbb{R} . Alors le principe local-global et l'approximation forte valent pour les points entiers de \mathcal{X} : L'image diagonale de $\mathcal{X}(\mathbb{Z})$ est dense dans le produit $\prod_p \mathcal{X}(\mathbb{Z}_p)$ des solutions locales entières sur tous les premiers p .

Dans une série d'articles [20, 21, 22], le second auteur a étudié le principe de Hasse et l'approximation faible en familles pour les points rationnels, en tenant compte des contraintes provenant du groupe de Brauer. Ces articles supposent la fibration $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ propre. Les démonstrations comportent essentiellement deux aspects : un aspect algébrique, l'étude du comportement du groupe de Brauer en famille et un aspect arithmétique, le choix d'une fibre dont l'ensemble de Brauer–Manin est non vide.

Pour le problème que nous considérons ici, la fibration n'est pas propre. La fibre générique est un espace homogène d'un groupe semisimple simplement connexe. La bonne connaissance que nous avons du groupe de Picard et du groupe de Brauer de tels espaces nous permet de les étudier en famille, ce qui donne la partie algébrique de la démonstration (Théorème 2.6).

Pour l'aspect arithmétique, dans le contexte d'approximation forte du présent article, un problème nouveau se présente : on doit travailler avec une place exceptionnelle v_0 qui est imposée au départ. Pour le résoudre, on développe une variante nouvelle de la méthode des fibrations (méthode qui avait été employée dans [20], [21] et [22]). En particulier un nouvel ingrédient crucial est le lemme 3.1.

Ces techniques permettent une réduction du problème d'approximation des points entiers sur X au cas des points entiers d'une fibre convenable du morphisme $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$, fibre qui est un espace homogène d'un k -groupe semi-simple simplement connexe, espace auquel on peut appliquer les résultats sur l'obstruction de Brauer-Manin entière établis par Fei Xu et le premier auteur [12], puis généralisés par Borovoi et Demarche [4].

Conventions et notations

Soit k un corps. Une k -variété X est par définition un k -schéma séparé de type fini. On note $k[X]^\times$ le groupe des fonctions inversibles sur X .

Si la k -variété X est intègre, on note $k(X)$ son corps des fonctions rationnelles.

Une k -variété est dite *scindée* si elle contient un ouvert non vide qui comme k -variété est géométriquement intègre.

Soit \bar{k} une clôture séparable de k . Pour toute k -variété X , on note \bar{X} la \bar{k} -variété $X \times_k \bar{k}$. De même si S est un schéma et \mathcal{X} un S -schéma, on note $\mathcal{X}_T := \mathcal{X} \times_S T$ pour tout S -schéma T .

On note $\text{Pic } X$ le groupe de Picard d'un schéma X et $\text{Br } X = H_{\text{ét}}^2(X, \mathbb{G}_m)$ son groupe de Brauer. On désigne aussi par $X^{(1)}$ l'ensemble des points de codimension 1 de X .

Soit k un corps de nombres. Pour v une place de k on note k_v le complété de k en v , et pour v non archimédienne, on note $O_v \subset k_v$ l'anneau des entiers. Pour S un ensemble fini de places de k , on note $\mathcal{O}_S \subset k$ l'anneau des entiers hors de S .

Pour la définition et les généralités sur l'obstruction de Brauer–Manin entière, nous renvoyons le lecteur aux introductions de [12] et [13]. En particulier si X est une k -variété, on note $X(\mathbb{A}_k)$ (resp. $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$) l'ensemble de ses points adéliques (resp. de ses points adéliques hors de v_0) ; pour tout sous-ensemble B de $\text{Br } X$, on note $X(\mathbb{A}_k)^B$ le sous-ensemble de $X(\mathbb{A}_k)$ constitué des points adéliques orthogonaux à B pour l'accouplement de Brauer-Manin et on pose $X(\mathbb{A}_k)^{\text{Br}} := X(\mathbb{A}_k)^{\text{Br } X}$.

2. Spécialisation du groupe de Brauer

Le but de ce paragraphe est de démontrer le théorème 2.6, analogue dans le présent cadre du théorème 2.3.1 de [21], qui traitait de fibrations propres sur la droite affine. Il faut adapter au présent contexte tous les arguments du §2 de [21].

Proposition 2.1. — Soit R un anneau de valuation discrète de corps résiduel k de caractéristique zéro. Soit K le corps des fractions de R . Soit \mathcal{X} un R -schéma lisse à fibres géométriquement intègres. Soit $p : \mathcal{X} \rightarrow \operatorname{Spec} R$ le morphisme structural. Soit X/K la fibre générique et Y/k la fibre spéciale. Supposons $H_{\text{ét}}^1(\overline{Y}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = 0$, c'est-à-dire que la fibre spéciale géométrique n'a pas de revêtement abélien connexe non trivial. Alors la flèche de restriction $\operatorname{Br}\mathcal{X} \rightarrow \operatorname{Br}X$ induit un isomorphisme

$$\operatorname{Br}\mathcal{X}/\operatorname{Br}R \xrightarrow{\sim} \operatorname{Br}X/\operatorname{Br}K$$

et une flèche de spécialisation

$$\operatorname{Br}X/\operatorname{Br}K \rightarrow \operatorname{Br}Y/\operatorname{Br}k.$$

(On fait systématiquement l'abus de langage d'écrire A/B plutôt que $A/\operatorname{Im}(B)$.)

Démonstration. — On a le diagramme commutatif de suites exactes

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \rightarrow & \operatorname{Br}R & \rightarrow & \operatorname{Br}K & \rightarrow & H^1(k, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) \rightarrow 0 \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \rightarrow & \operatorname{Br}\mathcal{X} & \rightarrow & \operatorname{Br}X & \rightarrow & H_{\text{ét}}^1(Y, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) \end{array}$$

La première suite exacte est bien connue [19], à la surjectivité à droite près, pour laquelle nous renvoyons à [2] et [10, Thm. B. 2.1].

La deuxième suite exacte résulte de la suite de localisation en cohomologie étale, de la suite exacte de Kummer, de l'injectivité du groupe de Brauer d'un schéma régulier intègre dans le groupe de Brauer de son corps des fonctions, et du théorème de pureté de Gabber (voir [16]). Sous les hypothèses faites sur Y , on a $H_{\text{ét}}^0(\overline{Y}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = \mathbb{Q}/\mathbb{Z}$ et $H_{\text{ét}}^1(\overline{Y}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = 0$, donc la flèche naturelle

$$H^1(k, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) \rightarrow H_{\text{ét}}^1(Y, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$$

est un isomorphisme. La proposition résulte alors du diagramme. \square

Proposition 2.2. — Soit R un anneau de valuation discrète. Soit K le corps des fractions de R . Soit \mathcal{X} un R -schéma lisse à fibres géométriquement intègres. Soit $p : \mathcal{X} \rightarrow \operatorname{Spec} R$ le morphisme structural. Soit $X = \mathcal{X}_K$ la fibre générique.

(1) La flèche de restriction $\operatorname{Pic}\mathcal{X} \rightarrow \operatorname{Pic}X$ est un isomorphisme.

(2) Soit $\operatorname{Spec} S \rightarrow \operatorname{Spec} R$ un revêtement galoisien (éventuellement infini) de groupe de Galois G . Supposons que l'on a :

(a) $S^\times \xrightarrow{\sim} H^0(\mathcal{X}_S, \mathbb{G}_m)$;

(b) $\operatorname{Br}S = 0$;

(c) $H^3(G, S^\times) = 0$.

Alors on a une suite exacte naturelle

$$0 \rightarrow H^1(G, \text{Pic } \mathcal{X}_S) \rightarrow \text{Br } \mathcal{X} / \text{Br } R \rightarrow [\text{Br } \mathcal{X}_S]^G \rightarrow H^2(G, \text{Pic } \mathcal{X}_S).$$

Démonstration. — L'énoncé (1) est classique. La suite exacte dans (2) provient de la suite spectrale de Leray pour le morphisme $\mathcal{X} \rightarrow \text{Spec } R$ et le faisceau \mathbb{G}_m , la démonstration est essentiellement celle de [21, Prop. 2.1]. \square

Proposition 2.3. — *Soit R un anneau de valuation discrète de corps résiduel k de caractéristique zéro. Soit K le corps des fractions de R . Soit R^h le hensélisé de R et R^{sh} le hensélisé strict. Soit K^h , resp. K^{sh} le corps des fractions de R^h , resp. R^{sh} . Fixons des inclusions $K \subset K^h \subset K^{sh} \subset \overline{K}$. Notons $\Gamma = \text{Gal}(\overline{k}/k) = \text{Gal}(K^{sh}/K^h)$ et $\Gamma_K = \text{Gal}(\overline{K}/K)$.*

Supposons $H^3(\Gamma, \overline{k}^\times) = 0$, $H^3(\Gamma, \mathbb{Z}) = 0$ et $H^3(\Gamma_K, \overline{K}^\times) = 0$.

Soit \mathcal{X} un R -schéma lisse à fibres géométriquement intègres. Soit $p : \mathcal{X} \rightarrow \text{Spec } R$ le morphisme structural. Soit $X = \mathcal{X}_K$ la fibre générique.

Supposons que l'on a $\mathbb{G}_{m,R} \xrightarrow{\sim} p_ \mathbb{G}_{m,\mathcal{X}}$ universellement sur $\text{Spec } R$.*

On a alors un diagramme commutatif de suites exactes

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 & \rightarrow & H^1(K, \text{Pic } X_{\overline{K}}) & \rightarrow & \text{Br } X / \text{Br } K & \rightarrow & [\text{Br } X_{\overline{K}}]^{\Gamma_K} \rightarrow H^2(K, \text{Pic } X_{\overline{K}}) \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 0 & \rightarrow & H^1(K^h, \text{Pic } X_{\overline{K}}) & \rightarrow & \text{Br } X_{K^h} / \text{Br } K^h & \rightarrow & [\text{Br } X_{\overline{K}}]^{\Gamma_{K^h}} \rightarrow H^2(K^h, \text{Pic } X_{\overline{K}}) \\
 & & \uparrow & & \parallel & & \uparrow \\
 0 & \rightarrow & H^1(\Gamma, \text{Pic } X_{K^{sh}}) & \rightarrow & \text{Br } X_{K^h} / \text{Br } K^h & \rightarrow & [\text{Br } X_{K^{sh}}]^{\Gamma} \rightarrow H^2(\Gamma, \text{Pic } X_{K^{sh}}) \\
 & & \parallel & & \uparrow \rho & & \uparrow \\
 0 & \rightarrow & H^1(\Gamma, \text{Pic } \mathcal{X}_{R^{sh}}) & \rightarrow & \text{Br } \mathcal{X}_{R^h} / \text{Br } R^h & \rightarrow & [\text{Br } \mathcal{X}_{R^{sh}}]^{\Gamma} \rightarrow H^2(\Gamma, \text{Pic } \mathcal{X}_{R^{sh}}) \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 0 & \rightarrow & H^1(\Gamma, \text{Pic } \overline{Y}) & \rightarrow & \text{Br } Y / \text{Br } k & \rightarrow & \text{Br } \overline{Y}^{\Gamma} \rightarrow H^2(\Gamma, \text{Pic } \overline{Y}).
 \end{array}$$

Si de plus $H^1(\overline{Y}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = 0$, la flèche ρ dans ce diagramme est un isomorphisme.

Démonstration. — Vérifions que les hypothèses de la proposition 2.2 sont satisfaites pour chacune des 5 lignes du diagramme. L'hypothèse (a) est par hypothèse satisfaite pour toutes.

Pour la ligne 5, (b) est automatique et (c) est l'hypothèse $H^3(k, \mathbb{G}_m) = 0$.

Pour la ligne 4, $\text{Br } R^{sh} = \text{Br } \overline{k} = 0$. Par ailleurs on a la suite exacte scindée de Γ -modules galoisiens donnée par la réduction modulo l'idéal maximal

$$1 \rightarrow R^{sh1} \rightarrow R^{sh\times} \rightarrow \overline{k}^\times \rightarrow 1$$

où R^{sh^1} est uniquement divisible. L'hypothèse $H^3(k, \mathbb{G}_m) = 0$ assure donc $H^3(\Gamma, R^{sh^\times}) = 0$.

Pour la ligne 3, on a la suite scindée de Γ -modules

$$1 \rightarrow R^{sh^\times} \rightarrow K^{sh^\times} \rightarrow \mathbb{Z} \rightarrow 0$$

donnée par la valuation. On a vu que l'égalité $H^3(k, \mathbb{G}_m) = 0$ implique alors $H^3(\Gamma, R^{sh^\times}) = 0$. Sous l'hypothèse $H^3(\Gamma, \mathbb{Z}) = 0$ on a donc $H^3(\Gamma, K^{sh^\times}) = 0$, c'est-à-dire la condition (c). Comme \bar{k} est algébriquement clos, on a

$$0 = \mathrm{Br} R^{sh} = \mathrm{Br} K^{sh}.$$

Pour la ligne 2, l'hypothèse (b) est automatique et (c) se lit $H^3(K^h, \mathbb{G}_m) = 0$. D'après [23], exemple (c) p. 108, il suffit de voir que $H^3(R^h, \mathbb{G}_m)$ et $H^2(k, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$ sont nuls. Or $H^2(k, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = H^3(\Gamma, \mathbb{Z})$ et $H^3(R^h, \mathbb{G}_m)$ est isomorphe à $H^3(k, \mathbb{G}_m)$ ([23], Rem. III.3.11).

Pour la ligne 1, l'hypothèse (b) est automatique et (c) se lit $H^3(\Gamma_K, \bar{K}^\times) = 0$.

La proposition 2.2 et les hypothèses sur la cohomologie de K donnent donc le diagramme de suites exactes ci-dessus, et la proposition 2.1. montre que, sous l'hypothèse $H^1(\bar{Y}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = 0$, l'homomorphisme $\rho : \mathrm{Br} \mathcal{X}_{R^h} / \mathrm{Br} R^h \rightarrow \mathrm{Br} X_{K^h} / \mathrm{Br} K^h$ est un isomorphisme. \square

Remarque 2.1. — Les hypothèses $H^3(\Gamma, \bar{k}^\times) = 0$, $H^3(\Gamma, \mathbb{Z}) = 0$ et $H^3(\Gamma_K, \bar{K}^\times) = 0$ sont satisfaites lorsque k est un corps de nombres et $K = k(t)$; voir par exemple [6] p. 199 et [20], p. 241.

Proposition 2.4. — Soient k un corps de caractéristique zéro, \bar{k} une clôture algébrique, et $\Gamma = \mathrm{Gal}(\bar{k}/k)$. Soit X une k -variété algébrique lisse et géométriquement intègre, et $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ un k -morphisme. Soit $K = k(\mathbb{A}^1)$ et soit G un K -groupe semisimple simplement connexe. Supposons que la fibre générique de f est un espace homogène de G , à stabilisateurs géométriques réductifs connexes. Il existe un ouvert non vide $U \subset \mathbb{A}_k^1$ tel que pour tout k -point M de U d'anneau local R , avec R de hensélisé R^h et de hensélisé strict R^{sh} , on ait (notant Y/k la fibre en M de f) :

(i) Les flèches naturelles

$$\mathrm{Pic} X_{R^{sh}} \rightarrow \mathrm{Pic} X_{K^{sh}} \rightarrow \mathrm{Pic} X_{\bar{K}}$$

sont des isomorphismes de réseaux, et la flèche naturelle

$$\mathrm{Pic} X_{R^{sh}} \rightarrow \mathrm{Pic} \bar{Y}$$

est un isomorphisme de Γ -réseaux, où on a noté $X_{R^{sh}} = X \times_{\mathbb{A}_k^1} R^{sh}$ via la flèche $\text{Spec } R \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ associée à M ; de même $X_{K^{sh}}$ et $X_{\overline{K}}$ sont définis par changement de base à partir de la fibre générique X_K .

(ii) Les flèches naturelles

$$\text{Br} X_{R^{sh}} \rightarrow \text{Br} X_{K^{sh}} \rightarrow \text{Br} X_{\overline{K}}$$

sont des isomorphismes de groupes abéliens finis, et la flèche de spécialisation

$$\text{Br} X_{R^{sh}} \rightarrow \text{Br} \overline{Y}$$

est un isomorphisme de Γ -modules finis.

(iii) Supposons $H^3(\Gamma, \overline{k}^\times) = 0$, ce qui est le cas si k est un corps de nombres. Alors la flèche naturelle

$$\text{Br} X_{R^h} / \text{Br} R^h \rightarrow \text{Br} Y / \text{Br} k$$

est un isomorphisme de groupes abéliens finis.

Démonstration. — Il existe un ouvert non vide $U \subset \mathbb{A}_k^1$ et un revêtement fini étale galoisien connexe $V \rightarrow U$, définissant une extension galoisienne finie L/K de corps, tels qu'on ait les propriétés suivantes :

- (a) Le groupe G s'étend en un U -groupe semisimple simplement connexe.
- (b) Il existe une section σ de $f_V : X_V \rightarrow V$.
- (c) Le stabilisateur H de cette section est un V -groupe réductif (à fibres connexes).

(d) Le groupe H s'inscrit dans une extension de V -groupes

$$1 \rightarrow H^{ss} \rightarrow H \rightarrow T \rightarrow 1$$

où T est un V -tore et H^{ss} est un V -groupe semisimple, groupe dérivé de H .

(e) On a une suite exacte de V -groupes

$$1 \rightarrow \mu \rightarrow H^{sc} \rightarrow H^{ss} \rightarrow 1,$$

où H^{sc} est un V -groupe semisimple simplement connexe, et μ est un V -schéma en groupes finis abéliens étales.

On dispose du H -torseur $G_V \rightarrow X_V$ défini par la section σ . Ce toseur a une restriction triviale au-dessus de l'image de $\sigma : V \rightarrow X_V$.

À une telle situation sont associés, de façon fonctorielle en tout V -schéma W , des homomorphismes

$$\begin{aligned} \mathbb{G}_m(W) &\rightarrow \mathbb{G}_m(X_W), \\ \widehat{T}(W) &\xrightarrow{\sim} \widehat{H}(W) \rightarrow \text{Pic } X_W, \end{aligned}$$

où la flèche $\widehat{H}(W) \rightarrow \text{Pic } X_W$ est associée au H_W -torseur $G_W \rightarrow X_W$, et

$$\text{Ext}_{W-gp}^c(H_W, \mathbb{G}_{m,W}) \rightarrow \text{Pic } H_W,$$

où Ext^c désigne le groupe des classes d'extensions centrales ; cette dernière flèche est définie via le fait qu'une telle extension centrale définit ipso facto un H_W -torseur sous $\mathbb{G}_{m,W}$.

Lemme 2.5. — *Soit A un anneau intègre. Soit H_A un A -schéma en groupes réductifs connexes. Alors la flèche*

$$\text{Ext}_{A-gp}^c(H_A, \mathbb{G}_{m,A}) \rightarrow \text{Pic } H_A,$$

définie comme ci-dessus est injective.

Démonstration. — Soit F le corps des fractions de A . Soit

$$1 \rightarrow \mathbb{G}_{m,A} \rightarrow E \rightarrow H_A \rightarrow 1$$

une extension centrale dont l'image dans $\text{Pic } H_A$ est nulle. Cela signifie qu'il existe une section $\sigma_A : H_A \rightarrow E$ du morphisme de A -schémas $E \rightarrow H_A$, section dont on peut supposer qu'elle envoie le neutre sur le neutre (quitte à la multiplier par un élément de $\mathbb{G}_{m,A}(A)$). Il s'agit alors de montrer que σ_A est de plus un homomorphisme de A -schémas en groupes. L'argument de la proposition 3.2 dans [8] (reposant sur le lemme de Rosenlicht) donne alors que la restriction de σ_A à la fibre générique est un morphisme $H_F \rightarrow E_F$ de F -schémas en groupes. Ceci implique que le morphisme de A -schémas séparés

$$H_A \times H_A \rightarrow E \quad (x, y) \mapsto \sigma_A(xy)\sigma_A(y)^{-1}\sigma_A(x)^{-1}$$

est constant égal au neutre sur la fibre générique, donc partout ; d'où le résultat. \square

Reprenons la preuve de la proposition 2.4. Pour tout V -schéma W on a aussi un homomorphisme

$$\text{Ext}_{W-gp}^c(H_W, \mathbb{G}_{m,W}) \rightarrow \text{Br}_e X_W,$$

où $\text{Br}_e X_W \subset \text{Br } X_W$ est le sous-groupe formé des éléments nuls sur $\sigma(W)$, et où la flèche est définie par cup-produit avec la classe dans $H_{\text{ét}}^1(X_W, H_W)$ du H_W -torseur $G_W \rightarrow X_W$, et des homomorphismes

$$\text{Pic } H_W \rightarrow \text{Pic } H_W^{ss},$$

$$\hat{\mu}(W) \rightarrow \text{Pic } H_W^{ss},$$

ce dernier étant associé au μ_W -torseur $H_W^{sc} \rightarrow H_W^{ss}$.

Pour W le spectre d'un corps, ces diverses applications sont discutées dans [25], [12] et [4].

On a donc des homomorphismes

$$(2.2) \quad \hat{\mu}(W) \rightarrow \text{Pic } H_W^{ss} \leftarrow \text{Pic } H_W \leftarrow \text{Ext}_{W-gp}^c(H_W, \mathbb{G}_{m,W}) \rightarrow \text{Br}_e X_W$$

Soit F un corps de caractéristique zéro. Pour un F -groupe G semisimple simplement connexe, on a les propriétés suivantes

$$F^\times \xrightarrow{\sim} F[G]^\times;$$

$$\text{Pic } G = 0;$$

$$\text{Br } F \xrightarrow{\sim} \text{Br } G.$$

Pour F algébriquement clos, les deux premières propriétés sont bien connues [25]. La troisième l'est aussi, elle est établie de façon algébrique dans [17]. Pour F quelconque, on en déduit le résultat général en utilisant la suite spectrale de Hochschild-Serre pour la cohomologie étale du faisceau \mathbb{G}_m .

Supposons que W est le spectre d'un corps F . La proposition 6.10 de [25] montre que la flèche naturelle

$$\hat{T}(F) \rightarrow \text{Pic } X_F$$

est un isomorphisme.

Considérons la suite d'homomorphismes :

$$\hat{\mu}(F) \rightarrow \text{Pic } H_F^{ss} \leftarrow \text{Pic } H_F \leftarrow \text{Ext}_{F-gp}^c(H_F, \mathbb{G}_{m,F}) \rightarrow \text{Br}_e X_F.$$

La première flèche est un isomorphisme ([25, Lemme 6.9]). La seconde flèche est un isomorphisme si F est algébriquement clos ([25, Cor. 6.11 et Rem. 6.11.3]). La troisième flèche est un isomorphisme ([8, Cor. 5.7]). La quatrième flèche est un isomorphisme; ceci résulte de [4, Thm. 2.8] et des égalités $\text{Pic } G_F = 0$ et $\text{Br } F = \text{Br } G_F$.

Soit M un k -point de U . Soit R le hensélisé de \mathbb{A}_k^1 en M et R^{sh} le hensélisé strict. Fixons une factorisation $\text{Spec } R^{sh} \rightarrow V \rightarrow U$ induisant $\text{Spec } R^{sh} \rightarrow \text{Spec } R$. Fixons aussi des plongements $K \subset K^h \subset K^{sh} \subset \overline{K}$. Soit Y/k la fibre de $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ en M .

On a un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc}
\widehat{T}(R^{sh}) & \rightarrow & \text{Pic } X_{R^{sh}} \\
\downarrow & & \downarrow \\
\widehat{T}(K^{sh}) & \rightarrow & \text{Pic } X_{K^{sh}} \\
\downarrow & & \downarrow \\
\widehat{T}(\overline{K}) & \rightarrow & \text{Pic } X_{\overline{K}},
\end{array}$$

Comme $T_{R^{sh}}$ est un tore déployé, les flèches verticales de gauche sont des isomorphismes. Comme on a dit, la proposition 6.10 de [25] implique que les deux flèches horizontales inférieures sont des isomorphismes. Le (1) de la proposition 2.2 montre que la verticale supérieure droite est un isomorphisme. On conclut que toutes les flèches dans ce diagramme sont des isomorphismes.

On a par ailleurs un diagramme commutatif

$$\begin{array}{ccc}
\widehat{T}(R^{sh}) & \rightarrow & \text{Pic } X_{R^{sh}} \\
\downarrow & & \downarrow \\
\widehat{T}(\overline{k}) & \rightarrow & \text{Pic } \overline{Y}
\end{array}$$

dans lequel toutes les flèches sauf peut-être la flèche $\text{Pic } X_{R^{sh}} \rightarrow \text{Pic } \overline{Y}$ sont des isomorphismes. Ainsi cette dernière flèche est un isomorphisme, ce qui achève d'établir l'énoncé (i).

Sur \overline{K} , tous les groupes intervenant dans (2.2) sont isomorphes au groupe fini $\hat{\mu}(\overline{K})$. Les groupes $\text{Br } X_{\overline{K}}$ et $\text{Ext}_{\overline{K}-gp}^c(H_{\overline{K}}, \mathbb{G}_{m, \overline{K}})$ sont donc finis.

Soit L/K une extension finie galoisienne de corps telle que l'application $\text{Br } X_L \rightarrow \text{Br } X_{\overline{K}}$ soit surjective et que l'application

$$\text{Ext}_{L-gp}^c(H_L, \mathbb{G}_{m, L}) \rightarrow \text{Ext}_{\overline{K}-gp}^c(H_{\overline{K}}, \mathbb{G}_{m, \overline{K}})$$

soit surjective.

Quitte à restreindre U , on peut de plus supposer que l'extension L/K est non ramifiée sur U , et que tout élément de $\text{Ext}_{\overline{K}-gp}^c(H_{\overline{K}}, \mathbb{G}_{m, \overline{K}})$ provient d'un élément de $\text{Ext}_{S-gp}^c(H_S, \mathbb{G}_{m, S})$, où S est la fermeture intégrale de U dans L .

Pour l'anneau local R d'un point $M \in U(k)$, on a

$$K \subset L \subset K^{sh} \subset \overline{K},$$

l'application $\text{Br } X_{K^{sh}} \rightarrow \text{Br } X_{\overline{K}}$ est surjective et l'application

$$\text{Ext}_{R^{sh}-gp}^c(H_{R^{sh}}, \mathbb{G}_{m, R^{sh}}) \rightarrow \text{Ext}_{\overline{K}-gp}^c(H_{\overline{K}}, \mathbb{G}_{m, \overline{K}})$$

est surjective.

D'après (2.2), on a un diagramme commutatif d'applications naturelles

$$\begin{array}{ccccccccc}
\hat{\mu}(\overline{K}) & \rightarrow & \text{Pic } H_{\overline{K}}^{ss} & \leftarrow & \text{Pic } H_{\overline{K}} & \leftarrow & \text{Ext}_{\overline{K}-gp}^c(H_{\overline{K}}, \mathbb{G}_{m, \overline{K}}) & \rightarrow & \text{Br}_e X_{\overline{K}} \\
\uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\
\hat{\mu}(K^{sh}) & \rightarrow & \text{Pic } H_{K^{sh}}^{ss} & \leftarrow & \text{Pic } H_{K^{sh}} & \leftarrow & \text{Ext}_{K^{sh}-gp}^c(H_{K^{sh}}, \mathbb{G}_{m, K^{sh}}) & \rightarrow & \text{Br}_e X_{K^{sh}} \\
\uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\
\hat{\mu}(R^{sh}) & \rightarrow & \text{Pic } H_{R^{sh}}^{ss} & \leftarrow & \text{Pic } H_{R^{sh}} & \leftarrow & \text{Ext}_{R^{sh}-gp}^c(H_{R^{sh}}, \mathbb{G}_{m, R^{sh}}) & \rightarrow & \text{Br}_e X_{R^{sh}} \\
\downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
\hat{\mu}(\overline{k}) & \rightarrow & \text{Pic } H_{\overline{k}}^{ss} & \leftarrow & \text{Pic } H_{\overline{k}} & \leftarrow & \text{Ext}_{\overline{k}-gp}^c(H_{\overline{k}}, \mathbb{G}_{m, \overline{k}}) & \rightarrow & \text{Br}_e \overline{Y}
\end{array}$$

Les flèches dans la verticale de gauche sont toutes des isomorphismes. Dans la première ligne, toutes les flèches sont des isomorphismes. Dans la seconde ligne, toutes les flèches sauf peut-être la flèche $\text{Pic } H_{K^{sh}}^{ss} \leftarrow \text{Pic } H_{K^{sh}}$ sont des isomorphismes. La flèche $\text{Pic } H_{K^{sh}}^{ss} \leftarrow \text{Pic } H_{K^{sh}}$ est injective via la proposition 6.10 de [25], car $\text{Pic } T_{K^{sh}} = 0$. Comme la flèche $\text{Br}_e X_{K^{sh}} \rightarrow \text{Br}_e X_{\overline{K}}$ est par nos hypothèses surjective, on conclut que toutes les flèches dans les deux premières lignes, ainsi qu'entre ces deux lignes, sont des isomorphismes.

Les flèches verticales entre la deuxième et la troisième ligne, sauf peut-être les deux dernières à droite, sont clairement des isomorphismes. On en déduit que les deux premières flèches de la troisième ligne sont des isomorphismes. La dernière flèche verticale entre les lignes trois et deux est une injection (régularité des schémas considérés).

Comme Y est un espace homogène d'un groupe semisimple simplement connexe pour une action dont les stabilisateurs sont connexes, on a $H^1(\overline{Y}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = 0$ et la proposition 2.1 montre que la flèche en question est un isomorphisme.

La dernière ligne est composée d'isomorphismes. On en conclut que les trois premières flèches verticales entre la troisième et la quatrième ligne sont des isomorphismes.

D'après ce qui précède, l'application

$$\text{Ext}_{R^{sh}-gp}^c(H_{R^{sh}}, \mathbb{G}_{m, R^{sh}}) \rightarrow \text{Ext}_{K^{sh}-gp}^c(H_{K^{sh}}, \mathbb{G}_{m, K^{sh}})$$

est surjective.

Par ailleurs la flèche $\text{Ext}_{R^{sh}-gp}^c(H_{R^{sh}}, \mathbb{G}_{m, R^{sh}}) \rightarrow \text{Pic } H_{R^{sh}}$ est injective d'après le lemme 2.5. Une chasse au diagramme donne alors que toutes les flèches sont des isomorphismes (de groupes finis).

Comme $\text{Br}_e(\bullet) = \text{Br}(\bullet)$ pour chacun des groupes dans la verticale de droite, on a maintenant établi l'énoncé (ii).

L'énoncé (iii) résulte alors de la proposition 2.3. et de sa démonstration, qui pour les deux lignes inférieures du grand diagramme, utilise seulement l'hypothèse $H^3(k, \mathbb{G}_m) = 0$. \square

On peut maintenant établir le théorème suivant, qu'on comparera avec [21, Thm. 2.3.1].

Théorème 2.6. — *Soit k un corps de nombres. Soit X une k -variété lisse et géométriquement intègre, et $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ un k -morphisme. Soit $K = k(\mathbb{A}^1)$ et soit G un K -groupe semisimple simplement connexe. Supposons que la fibre générique de f est un espace homogène de G , à stabilisateurs géométriques réductifs connexes. Il existe alors un sous-ensemble hilbertien Hil de $\mathbb{A}^1(k)$ tel que pour tout point $m \in Hil$ la fibre X_m soit lisse et que l'on ait un isomorphisme naturel de groupes finis*

$$\mathrm{Br} X_\eta / \mathrm{Br} K \xrightarrow{\sim} \mathrm{Br} X_m / \mathrm{Br} k.$$

Démonstration. — On reprend les notations de la démonstration précédente. On note déjà que $\mathbb{G}_m = p_* \mathbb{G}_m$ universellement sur la fibre générique $p : X_\eta \rightarrow \mathrm{Spec} K$, via le lemme de Rosenlicht (car G est semi-simple).

On suppose que l'extension finie galoisienne L/K est suffisamment grosse pour que comme précédemment l'application $\mathrm{Br} X_L \rightarrow \mathrm{Br} X_{\overline{K}}$ soit surjective, mais aussi que l'application de restriction $\mathrm{Pic} X_L \rightarrow \mathrm{Pic} X_{\overline{K}}$ soit surjective, et donc un isomorphisme de réseaux, l'injectivité résultant de $\overline{K}^\times \xrightarrow{\sim} \overline{K}[X_\eta]^\times$. Soit $\Delta = \mathrm{Gal}(L/K)$.

D'après le théorème d'irréductibilité de Hilbert, il existe un sous-ensemble hilbertien Hil de $\mathbb{A}^1(k)$ tel que pour tout point $m \in Hil$ la fibre $Y = X_m$ soit lisse, l'extension L/K soit non ramifiée en m et m soit *inerte* dans L . En tout tel point on a donc une extension induite de corps de nombres l/k de groupe de Galois Δ . La hensélisation donne également une extension galoisienne L^h/K^h de groupe Δ . On a les inclusions de corps

$$K \subset L \subset L^h \subset K^{sh} \subset \overline{K}.$$

Les applications $\mathrm{Pic} X_L \rightarrow \mathrm{Pic} X_{L^h} \rightarrow \mathrm{Pic} X_{K^{sh}} \rightarrow \mathrm{Pic} X_{\overline{K}}$ sont des isomorphismes de réseaux.

On considère le diagramme commutatif de suites exactes (proposition 2.3 et remarque 2.1) :

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & \rightarrow & H^1(K, \mathrm{Pic} X_{\overline{K}}) & \rightarrow & \mathrm{Br} X / \mathrm{Br} K & \rightarrow & [\mathrm{Br} X_{\overline{K}}]^{\Gamma_K} & \rightarrow & H^2(K, \mathrm{Pic} X_{\overline{K}}) \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \rightarrow & H^1(K^h, \mathrm{Pic} X_{\overline{K}}) & \rightarrow & \mathrm{Br} X_{K^h} / \mathrm{Br} K^h & \rightarrow & [\mathrm{Br} X_{\overline{K}}]^{\Gamma_{K^h}} & \rightarrow & H^2(K^h, \mathrm{Pic} X_{\overline{K}}) \end{array}$$

On a

$$H^1(\Delta, \text{Pic } X_L) = H^1(K, \text{Pic } X_{\overline{K}})$$

et $H^1(\Delta, \text{Pic } X_{L^h}) = H^1(K^h, \text{Pic } X_{\overline{K}})$. Ainsi la première flèche verticale est un isomorphisme.

Comme $\text{Br } X_L \rightarrow \text{Br } X_{\overline{K}}$ est surjectif, l'action de Γ_K sur $\text{Br } X_{\overline{K}}$ se factorise par Δ . On a alors $[\text{Br } X_{\overline{K}}]^{\Gamma_K} \xrightarrow{\sim} [\text{Br } X_{\overline{K}}]^{\Gamma_{K^h}}$.

On a, via la suite de restriction-inflation, le diagramme commutatif de suites exactes :

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \rightarrow & H^2(\Delta, \text{Pic } X_L) & \rightarrow & H^2(K, \text{Pic } X_{\overline{K}}) & \rightarrow & H^2(L, \text{Pic } X_{\overline{K}}) \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \rightarrow & H^2(\Delta, \text{Pic } X_{L^h}) & \rightarrow & H^2(K^h, \text{Pic } X_{\overline{K}}) & \rightarrow & H^2(L^h, \text{Pic } X_{\overline{K}}). \end{array}$$

La flèche $H^2(\Delta, \text{Pic } X_L) \rightarrow H^2(\Delta, \text{Pic } X_{L^h})$ est un isomorphisme.

Comme le groupe $\text{Br } X_{\overline{K}}$ est fini, on peut à l'avance choisir L de façon que de plus l'image de $[\text{Br } X_{\overline{K}}]^{\Gamma_K}$ dans $H^2(K, \text{Pic } X_{\overline{K}})$ s'annule dans $H^2(L, \text{Pic } X_{\overline{K}})$ et donc dans $H^2(L^h, \text{Pic } X_{\overline{K}})$. On a alors le diagramme commutatif de suites exactes

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & \rightarrow & H^1(K, \text{Pic } X_{\overline{K}}) & \rightarrow & \text{Br } X / \text{Br } K & \rightarrow & [\text{Br } X_{\overline{K}}]^{\Gamma_K} & \rightarrow & H^2(\Delta, \text{Pic } X_L) \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \rightarrow & H^1(K^h, \text{Pic } X_{\overline{K}}) & \rightarrow & \text{Br } X_{K^h} / \text{Br } K^h & \rightarrow & [\text{Br } X_{\overline{K}}]^{\Gamma_{K^h}} & \rightarrow & H^2(\Delta, \text{Pic } X_{L^h}) \end{array}$$

dans lequel toutes les flèches sauf peut-être $\text{Br } X / \text{Br } K \rightarrow \text{Br } X_{K^h} / \text{Br } K^h$ sont des isomorphismes. On en conclut que cette dernière flèche est un isomorphisme. En combinant avec la proposition 2.4, on obtient le théorème.

□

Remarque 2.3. — Lorsque les stabilisateurs géométriques pour l'action de G sur la fibre générique X_K sont des tores algébriques, ce qui sera le cas au §4, les démonstrations de ce paragraphe se simplifient. On a en effet alors $\hat{\mu} = 0$, $\text{Br } X_{\overline{K}} = 0$, $\text{Br } X_{R^{sh}} = 0$, $\text{Br } \overline{Y} = 0$.

3. Le théorème

On commence par quelques lemmes préliminaires.

Lemme 3.1. — Soit k un corps de nombres. Soient W une k -variété lisse et géométriquement intègre de corps des fonctions K et $\rho : W' \rightarrow W$ un revêtement étale, galoisien de groupe G **abélien**, avec W' intègre. Soit k' la fermeture algébrique de k dans le corps des fonctions K' de W' . Soit S un ensemble fini de places de k tel que ρ s'étende en un revêtement étale

(de groupe G) de \mathcal{O}_S -schémas lisses $\mathcal{W}' \rightarrow \mathcal{W}$. On note H le sous-groupe $\text{Gal}(K'/Kk')$ de G . Pour toute place $v \notin S$ de k , on note $F(v)$ son corps résiduel et $f_v \in \text{Gal}(k'/k)$ le Frobenius associé relativement à l'extension k'/k . Alors pour presque toute place v de k , on a la propriété suivante :

Pour tout élément $\sigma \in G$ dont la classe $\bar{\sigma} \in G/H$ est f_v , il existe un $F(v)$ -point $Q(v)$ de \mathcal{W} tel que le Frobenius $F_{Q(v)}$ relativement au revêtement ρ soit σ .

Démonstration. — Le revêtement $\mathcal{W}' \rightarrow \mathcal{W}$ se factorise par un revêtement $\mathcal{W}' \rightarrow \mathcal{W}_1$ de groupe H , avec $\mathcal{W}_1 = \mathcal{W} \times_{\mathcal{O}_S} \mathcal{O}_{k', S_1}$ (où S_1 est l'ensemble des places de k' au-dessus de S) ; en particulier la fibre générique de $\mathcal{W}' \rightarrow \text{Spec } \mathcal{O}_{k', S_1}$ est géométriquement intègre sur k' . On peut donc supposer (quitte à élargir S) que pour toute place w de k' au-dessus d'une place $v \notin S$ de k , la fibre W'_w de $\mathcal{W}' \rightarrow \text{Spec } \mathcal{O}_{k', S_1}$ en w est géométriquement intègre sur le corps résiduel $F(w)$ de w . Notons W'_v et W_v les fibres respectives de $\mathcal{W}' \rightarrow \text{Spec } \mathcal{O}_S$ et $\mathcal{W} \rightarrow \text{Spec } \mathcal{O}_S$ en v .

Soit $d := [k' : k]$ (c'est le cardinal de G/H). Soit v une place de k non dans S . Soit $\theta_v \in H^1(F(v), G) = H^1(\hat{\mathbb{Z}}, G/H) \xrightarrow{\sim} G$ l'élément correspondant à σ . Son image dans $H^1(F(v), G/H) = H^1(\hat{\mathbb{Z}}, G/H) \xrightarrow{\sim} G/H$ correspond à $f_v = \bar{\sigma}$. Le lemme est équivalent au fait que (pour presque toute place v) il existe un $F(v)$ -point sur le tordu W'_{θ_v} du G -torseur $W'_v \rightarrow W_v$ par θ_v . Comme l'image de θ_v dans $H^1(F(v), G/H)$ est f_v , le G/H -torseur $W'_{\theta_v}/H \rightarrow W_v$ est trivial et W'_{θ_v} est donc union disjointe de d exemplaires d'une $F(v)$ -variété Z . Par définition d'un tordu, les schémas $W'_{\theta_v} \times_{F(v)} \overline{F(v)}$ et $W'_v \times_{F(v)} \overline{F(v)}$ sont isomorphes. Pour toute place w de k' divisant v , on sait que W'_w est géométriquement intègre sur $F(w)$; il en résulte que le schéma $W'_v \times_{F(v)} \overline{F(v)}$ possède exactement d composantes connexes, ce qui implique la même propriété pour $W'_{\theta_v} \times_{F(v)} \overline{F(v)}$, et donc que Z est géométriquement intègre sur $F(v)$ (car géométriquement connexe et lisse). On conclut avec le théorème de Lang-Weil (cf. [26], théorème 1, étape 3).

□

Lemme 3.2. — Soient k un corps de nombres, G un $k(t)$ -groupe linéaire connexe, Y une $k(t)$ -variété espace homogène de G . Soit v une place de k . Soit k_v le complété de k en v et $k_v^h \subset k_v$ le sous-corps des éléments algébriques sur k . Si Y possède un $k_v(t)$ -point, alors Y possède un $k_v^h(t)$ -point.

Démonstration. — Soit $Z \subset \mathbf{P}_{k(t)}^N$ une compactification projective lisse de la $k(t)$ -variété quasi-projective Y (une telle compactification existe via le théorème de résolution des singularités d'Hironaka). Soit $\mathcal{Z} \subset \mathbf{P}_k^N \times_k \mathbf{P}_k^1$ l'adhérence schématique de Z . L'espace des k -morphisms $\mathrm{Mor}(\mathbf{P}_k^1, \mathbf{P}_k^n)$ est la réunion disjointe des k -variétés $\mathrm{Mor}_d(\mathbf{P}_k^1, \mathbf{P}_k^n)$ paramétrisant les morphismes de degré d pour d entier, $d \geq 0$. Ainsi l'espace des sections de $\mathcal{Z} \rightarrow \mathbf{P}_k^1$ est une union disjointe de k -variétés W_i . Par hypothèse, il existe une $k_v(t)$ -section de $Y/k(t)$, donc de $Z/k(t)$, donc une k_v -section de $\mathcal{Z} \rightarrow \mathbf{P}_k^1$. Ainsi l'un des $W_i(k_v)$ est non vide. Il est connu (cf. [5, Chap. 3.6, Cor. 10]) que ceci implique $W_i(k_v^h) \neq \emptyset$. Par conséquent, la $k(t)$ -variété lisse Z possède un $k_v^h(t)$ -point. Un théorème de M. Florence [15] assure alors que l'espace homogène $Y/k(t)$ possède un $k_v^h(t)$ -point. \square

Dans le lemme suivant, on ne peut pas remplacer $k_v^h(t)$ par $k_v(t)$.

Lemme 3.3. — *Soit k un corps de nombres. Soit k_v^h le sous-corps des éléments de k_v algébriques sur k (pour v non archimédienne c'est le hensélisé de k en v). Soit t une variable. L'application naturelle $\mathrm{Br}k(t) \rightarrow \mathrm{Br}k_v^h(t)$ est surjective.*

Démonstration. — Notons $E = k_v^h$. Les suites exactes de Faddeev ([18], Cor. 6.4.6.) pour le groupe de Brauer de $k(t)$ et le groupe de Brauer de $E(t)$ sont compatibles. On a donc le diagramme commutatif de suites exactes

$$\begin{array}{ccccccc}
 (3.1) & 0 & \longrightarrow & \mathrm{Br}k & \longrightarrow & \mathrm{Br}k(t) & \longrightarrow & \bigoplus_{x \in \mathbb{A}_k^1(1)} H^1(k(x), \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) & \longrightarrow & 0 \\
 & & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 & 0 & \longrightarrow & \mathrm{Br}E & \longrightarrow & \mathrm{Br}E(t) & \longrightarrow & \bigoplus_{x \in \mathbb{A}_k^1(1)} [\bigoplus_{y \in \mathbb{A}_E^1(1), y \mapsto x} H^1(E(y), \mathbb{Q}/\mathbb{Z})] & \longrightarrow & 0.
 \end{array}$$

Pour L un corps de nombres et S un ensemble fini de places de L , l'application de restriction

$$H^1(L, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) \rightarrow \prod_{w \in S_L} H^1(L_w, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$$

est surjective. Ceci est une conséquence du théorème de Grunwald-Wang [1, Chap. 10, Thm. 5, p. 103]. Il en est donc de même de l'application de restriction

$$H^1(L, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) \rightarrow \prod_{w \in S_L} H^1(L_w^h, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}).$$

En appliquant ceci à chaque $k(x)$ et à S l'ensemble des places de $k(x)$ au-dessus de la place v de k , on voit que la flèche verticale de droite dans le diagramme ci-dessus est surjective.

Pour L un corps de nombres et w une place de L , les applications naturelles de restriction $H^1(L_w^h, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) \rightarrow H^1(L_w, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$ et $\mathrm{Br}L_w^h \rightarrow \mathrm{Br}L_w$ sont des isomorphismes. La théorie du corps de classes montre que l'application $\mathrm{Br}L \rightarrow \mathrm{Br}L_w$ est surjective. Il en est donc de même de l'application de restriction $\mathrm{Br}L \rightarrow \mathrm{Br}L_w^h$. La flèche verticale de gauche dans le diagramme commutatif ci-dessus est donc surjective.

Il en résulte que la flèche verticale médiane est surjective. \square

Sur un corps k quelconque, un k -groupe réductif G est dit *isotrope* s'il existe un k -homomorphisme non constant $\mathbb{G}_{m,k} \rightarrow G$. Sur un corps local k , un k -groupe réductif G est *isotrope* si et seulement si l'espace topologique $G(k)$ est non compact (critère de Godement, Bruhat et Tits, cf. Prasad [24]).

Nous sommes maintenant à pied d'oeuvre pour établir le théorème principal de cet article.

Théorème 3.4. — *Soit k un corps de nombres. Soient X une k -variété lisse et géométriquement intègre et $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ un k -morphisme. Supposons $X(\mathbb{A}_k) \neq \emptyset$. Soit $K = k(\mathbb{A}^1)$ et soit G un K -groupe semisimple simplement connexe, absolument presque K -simple.*

On suppose :

(i) *La fibre générique X_η/K de f est un espace homogène de G à stabilisateurs réductifs connexes.*

(ii) *Toutes les fibres de f sont scindées.*

(iii) *Il existe une place v_0 de k telle que : la fibre générique X_η possède un $k_{v_0}(t)$ -point et il existe un ouvert de Zariski V de \mathbb{A}_k^1 tel que la spécialisation G_x/k_{v_0} du $k(t)$ -groupe G en tout point $x \in V(k_{v_0})$ soit définie et soit semi-simple, simplement connexe, isotrope.*

(iv) *L'une des deux hypothèses suivantes est satisfaite :*

(iv.a) *Pour tout élément $\alpha \in \mathrm{Br}X$, l'application d'évaluation $\mathrm{ev}_\alpha : X(k_{v_0}) \rightarrow \mathrm{Br}k_{v_0}$ est constante.*

(iv.b) *Il existe un ouvert de Zariski non vide V_0 de \mathbb{A}_k^1 tel que par tout $k_{v_0}^h$ -point de $f^{-1}(V_0) \subset X$ il passe une section rationnelle de $f_{k_{v_0}^h}^h$.*

Alors l'image diagonale de $X(k)$ dans la projection de $X(\mathbb{A}_k)^{\mathrm{Br}X}$ sur $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$ est dense.

Démonstration. — Commençons par établir le lemme suivant.

Lemme 3.5. — *Sous les hypothèses du théorème, les groupes $\mathrm{Br}X_\eta/\mathrm{Br}K$ et $\mathrm{Br}X/\mathrm{Br}k$ sont finis.*

Démonstration. — D’après la proposition 2.4, sous l’hypothèse (i), d’une part le module galoisien $\mathrm{Pic} X_{\overline{K}}$ est un réseau, donc $H^1(K, \mathrm{Pic} X_{\overline{K}})$ est fini, d’autre part le groupe $\mathrm{Br}X_{\overline{K}}$ est fini. D’après la proposition 2.3 et la remarque 2.1, ceci implique que le groupe $\mathrm{Br}X_\eta/\mathrm{Br}K$ est fini. Soit $\alpha \in \mathrm{Br}K$ dont l’image β dans $\mathrm{Br}X_\eta$ appartient au sous-groupe $\mathrm{Br}X$. Les résidus de β aux points de codimension 1 de X sont nuls. L’hypothèse (ii) assure alors que les résidus de α aux points de codimension 1 de \mathbb{A}_k^1 sont nuls. Ceci implique que α appartient à l’image de $\mathrm{Br}k$ dans $\mathrm{Br}K$. Comme $\mathrm{Br}X_\eta/\mathrm{Br}K$ est fini, on en déduit que $\mathrm{Br}X/\mathrm{Br}k$ est fini. \square

Il existe un ensemble fini S de places de k contenant v_0 et les places archimédiennes et un \mathcal{O}_S -schéma lisse de type fini \mathcal{X} équipé d’un \mathcal{O}_S -morphisme $\mathcal{X} \rightarrow \mathbb{A}_{\mathcal{O}_S}^1$ qui étend $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$.

Pour chaque place $v \in S \setminus \{v_0\}$, on se donne un ouvert $W_v \subset X(k_v)$. On suppose que l’ensemble

$$E := [X(k_{v_0}) \times \prod_{v \in S \setminus \{v_0\}} W_v \times \prod_{v \notin S} \mathcal{X}(O_v)]^{\mathrm{Br}X}$$

est non vide. On veut montrer que l’ensemble

$$X(k_{v_0}) \times \prod_{v \in S \setminus \{v_0\}} W_v \times \prod_{v \notin S} \mathcal{X}(O_v)$$

contient un point de $X(k)$.

Notons que chaque $\mathcal{X}(O_v) \subset X(k_v)$ est un ouvert non vide pour la topologie v -adique. Pour établir l’énoncé ci-dessus, on peut donc remplacer S par tout ensemble fini de places le contenant.

Choisissons un sous-ensemble fini Γ de $\mathrm{Br}X_\eta$ dont l’image modulo $\mathrm{Br}K$ est le groupe fini $\mathrm{Br}X_\eta/\mathrm{Br}K$.

Par hypothèse, on dispose ici d’un $k_{v_0}(t)$ -point de la K -variété X_η , et donc (Lemme 3.2) d’un $k_{v_0}^h(t)$ -point $s_{v_0}(t)$ de la K -variété X_η . D’après le lemme 3.3, quitte à modifier chaque élément de Γ par un élément de $\mathrm{Br}K$, on peut imposer

$$\alpha(s_{v_0}(t)) = 0 \in \mathrm{Br}k_{v_0}(t)$$

pour tout $\alpha \in \Gamma$. Ceci vaut encore si on remplace $\Gamma \subset \mathrm{Br}X_\eta$ par le sous-groupe qu’il engendre, sous-groupe qui est fini puisque $\mathrm{Br}X_\eta$ est de torsion.

On note ce sous-groupe désormais B . Posons $B' = B \cap \text{Br}X$ et

$$E' := [X(k_{v_0}) \times \prod_{v \in S \setminus \{v_0\}} W_v \times \prod_{v \notin S} \mathcal{X}(O_v)]^{B'}$$

Une fois fixé le groupe fini B , il existe un ouvert non vide $U_0 \subset \mathbb{A}_k^1$ tel que les éléments de B soient non ramifiés sur $U := f^{-1}(U_0)$. En d'autres termes, on a $B \subset \text{Br}U$. Quitte à restreindre U_0 , on peut supposer que $f : U \rightarrow U_0$ est lisse à fibres géométriquement intègres, que le groupe G/K s'étend en un U_0 -schéma en groupes semisimples G_0 , que $U \rightarrow U_0$ est un G_0 -espace homogène, et que de plus $s_{v_0}(t)$ définit une section de la restriction de f au-dessus de $U_0 \times_k k_{v_0}^h$.

Sous l'hypothèse (iv.b), on opère comme suit. En utilisant la finitude de $\text{Br}X/\text{Br}k$, on peut dans $E \neq \emptyset$ partir d'un adèle dont la composante Q_{v_0} appartient à $f^{-1}(V_0)(k_{v_0}^h)$, et prendre une section $s_{v_0}(t)$ de f sur $k_{v_0}^h$ passant par ce point Q_{v_0} . On détermine alors comme ci-dessus Γ , B et B' finis, et enfin E' . Quitte à bouger encore le point Q_{v_0} sur la section définie par $s_{v_0}(t)$, on peut supposer qu'on a un point $Q_{v_0} \in U(k_{v_0}^h)$, par lequel passe la section $s_{v_0}(t)$, et qui peut être complété en un point adélique de X qui est dans l'ensemble E' .

Fixons un point $P_{v_0} \in U(k_{v_0})$ (égal à Q_{v_0} si on a fait l'hypothèse (iv.b)) dans l'image de $U_0(k_{v_0})$ par la section $s_{v_0}(t)$. Tout $\alpha \in B$ est défini en P_{v_0} et satisfait

$$(3.2) \quad \alpha(P_{v_0}) = 0.$$

Si on a fait l'hypothèse (iv.b), on peut même prendre $P_{v_0} = Q_{v_0}$, et donc supposer que P_{v_0} peut être complété en un point adélique de X qui est dans l'ensemble E' .

Notons $\{m_1, \dots, m_l\} \in \mathbb{A}_k^1$ les points fermés dans le complémentaire de U_0 .

Pour tout tel point m_i , on note k_i le corps résiduel en m_i . Pour tout i , d'après l'hypothèse (ii), il existe au moins une composante géométriquement intègre de multiplicité 1 de la fibre X_{m_i} . On fixe un ouvert lisse non vide W_i d'une telle composante. On note $K_i = k_i(W_i)$. Soit K'_i/K_i une extension abélienne finie telle que tous les résidus des éléments de B au point générique de W_i appartiennent à $H^1(K'_i/K_i, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$. Quitte à restreindre W_i , on peut supposer que la fermeture intégrale W'_i de W_i dans K'_i est finie étale sur W_i . Soit k'_i la fermeture intégrale de k_i dans K'_i .

On agrandit S de façon à avoir les propriétés suivantes :

(a) Le k -morphisme $f : U \rightarrow U_0$ s'étend en un \mathcal{O}_S -morphisme lisse $\mathcal{U} \rightarrow \mathcal{U}_0$ de \mathcal{O}_S -schémas, avec $\mathcal{U} \subset \mathcal{X}_{\mathcal{O}_S}$, tel que pour tout point fermé $x \in \mathcal{U}_0$, de corps résiduel le corps fini $F(x)$, la fibre $f^{-1}(x)$ possède un $F(x)$ -point. Comme les fibres de $U \rightarrow U_0$ sont géométriquement intègres, ceci est possible par les estimées de Lang–Weil (cf. [26], théorème 1, étape 3). On peut aussi supposer $\mathcal{U}_0 \rightarrow \operatorname{Spec} \mathcal{O}_S$ surjectif, ce qui assure $\mathcal{U}(O_v) \neq \emptyset$ pour $v \notin S$.

(b) Les polynômes unitaires $P_i(t) \in k[t]$ définissant les points m_i sont \mathcal{O}_S -entiers, et le produit $\prod_i P_i(t)$ a une réduction séparable en toute place finie $v \notin S$. Notons $\mathbf{m}_i = \operatorname{Spec} \mathcal{O}_S[t]/P_i(t)$.

(c) Les éléments de B appartiennent à $\operatorname{Br} \mathcal{U}$.

(d) Les morphismes $W_i \subset X_{m_i} \subset X$, où la première flèche est une immersion ouverte de k_i -variétés et la seconde une immersion fermée de k -variétés, s'étendent en des morphismes $\mathcal{W}_i \subset \mathcal{X}_{\mathbf{m}_i} \subset \mathcal{X}$, le premier étant une immersion ouverte de \mathbf{m}_i -schémas, le second une immersion fermée de \mathcal{O}_S -schémas.

(e) Le k_i -morphisme fini étale $W'_i \rightarrow W_i$ s'étend en un morphisme fini étale surjectif $\mathcal{W}'_i \rightarrow \mathcal{W}_i$ de \mathbf{m}_i -schémas lisses, et les résidus des éléments de B sont dans $H^1(\mathcal{W}'_i/\mathcal{W}_i, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = H^1(K'_i/K_i, \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$.

(f) Pour tout i , toute place w de k_i non au-dessus d'une place de S , et tout élément σ de $\operatorname{Gal}(K'_i/K_i)$ dont l'image dans $\operatorname{Gal}(k'_i/k_i)$ est le Frobenius associé à w , la fibre de \mathcal{W}_i en w possède un $F(w)$ -point dont le Frobenius (relativement au revêtement $\mathcal{W}'_i/\mathcal{W}_i$) est σ . **Ceci est possible grâce au lemme 3.1.** En particulier pour toute place v de k non dans S et tout i , la fibre de \mathcal{W}_i au-dessus de tout $F(v)$ -point de \mathbf{m}_i possède un $F(v)$ -point – mais il se peut que ni \mathbf{m}_i ni a fortiori \mathcal{W}_i n'aient de $F(v)$ -point.

(g) Tout élément du groupe fini $B' = B \cap \operatorname{Br} X$ appartient à $\operatorname{Br} \mathcal{X}$.

Lemme 3.6. — *Avec les hypothèses et notations ci-dessus, le point P_{v_0} peut être complété en un point adélique*

$$(P_v) \in [X(k_{v_0}) \times \prod_{v \in S \setminus \{v_0\}} W_v \times \prod_{v \notin S} \mathcal{U}(O_v)]^{B'} \subset E'.$$

Démonstration. — Si on a fait l'hypothèse (iv.b), on sait déjà que P_{v_0} peut être complété en un point adélique (P_v) de E' . D'après la propriété (g) ci-dessus, les éléments de B' s'annulent sur $\mathcal{X}(O_v)$ pour $v \notin S$, on peut donc pour chaque $v \notin S$ choisir $P_v \in \mathcal{U}(O_v)$. Supposons (iv.a). Comme B s'annule en P_{v_0} , tout élément du groupe B' s'annule en P_{v_0} . Mais alors, comme tout élément de $\operatorname{Br} X$ est par hypothèse constant quand évalué sur $X(k_{v_0})$, ceci

implique que tout élément de B' s'annule sur $X(k_{v_0})$. Par hypothèse, l'ensemble E' (qui contient E) est non vide. Pour $v \notin S$, on a $\mathcal{U}(O_v) \neq \emptyset$ et tout élément de B' s'annule sur $\mathcal{U}(O_v)$. Pour toute place v , l'ensemble $U(k_v)$ est dense dans $X(k_v)$ pour la topologie v -adique. Il existe donc une famille $(P_v) \in U(\mathbb{A}_k)^{B'}$ avec $P_v \in U(k_v) \cap W_v$ pour toute place $v \in S \setminus \{v_0\}$, et $P_v \in \mathcal{U}(O_v)$ pour $v \notin S$, donc $(P_v) \in U(\mathbb{A}_k)$. Comme B' s'annule en tout point de $X(k_{v_0})$, on peut prendre pour P_{v_0} le point fixé plus haut. \square

On fixe désormais un point adélique (P_v) comme dans le lemme ci-dessus.

Le *lemme formel* [20, Lemme 2.6.1] sous la forme donnée dans [7, démonstration du Thm. 1.4], appliqué à $U \subset X$, assure alors l'existence d'un ensemble fini T de places, $T \cap S = \emptyset$ et pour $v \in T$ de points $M_v \in U(k_v) \cap \mathcal{X}(O_v)$ tels que

$$(3.3) \quad \sum_{v \in S} \alpha(P_v) + \sum_{v \in T} \alpha(M_v) = 0 \in \mathbb{Q}/\mathbb{Z}$$

pour tout $\alpha \in B$.

Pour chaque $i = 1, \dots, l$, on choisit (ce qui est possible par le théorème de Tchebotarev) des places w_i^j ($j = 1, \dots, s_i$) de k_i de degré absolu 1, ne divisant pas de places de $S \cup T$, deux à deux distinctes (et dont les places induites v_i^j de k sont distinctes pour des i distincts), dont les Frobenius associés dans l'extension abélienne k'_i/k_i parcourent tous les éléments de $\text{Gal}(k'_i/k_i)$. En particulier on pourra appliquer le lemme 3.1 aux places w_i^j . On fixe $\theta_i^j \in O_{v_i^j}$ tel que $v_i^j(P_i(\theta_i^j)) = 1$, ce qui est possible car w_i^j est de degré 1 sur v_i^j .

En utilisant l'approximation forte hors de v_0 , on trouve $\theta \in \mathcal{O}_S$ très proche de chaque $f(P_v)$ pour $v \in S \setminus \{v_0\}$, de $f(M_v) \in O_v$ pour $v \in T$ et de $\theta_i^j \in O_{v_i^j}$ pour $i = 1, \dots, l$ et tout j . En particulier $v_i^j(P_i(\theta)) = 1$ pour tous i, j . On a $\theta \in U_0(k)$.

Le théorème 2.6 combiné avec le théorème d'irréductibilité de Hilbert avec approximation forte (Ekedahl [14]) permet de choisir θ de façon à ce que *par spécialisation l'image du groupe B soit $\text{Br}X_\theta/\text{Br}k$* .

On dispose maintenant du \mathcal{O}_S -schéma \mathcal{X}_θ . Soit X_θ sa fibre générique.

Lemme 3.7. — *L' \mathcal{O}_S -schéma \mathcal{X}_θ possède :*

- pour $v \in S$, un k_v -point P'_v , qui est de plus dans W_v si $v \neq v_0$,
- pour $v \in T$, un \mathcal{O}_v -point M'_v ,

tels que pour tout $\alpha \in B$ on ait

$$(3.4) \quad \sum_{v \in S} \alpha(P'_v) + \sum_{v \in T} \alpha(M'_v) = 0.$$

De plus \mathcal{X}_θ possède des points entiers $N_v \in \mathcal{X}(\mathcal{O}_v)$ pour toute place $v \notin S \cup T$.

Démonstration. — Pour $v \in T \cup S \setminus \{v_0\}$, on utilise le théorème des fonctions implicites. On obtient des points P'_v sur X_θ arbitrairement proche des P_v pour $v \in S \setminus \{v_0\}$ (donc dans W_v) et des points M'_v arbitrairement proche des M_v (donc entiers) pour $v \in T$. De (3.3) on déduit

$$(3.5) \quad \sum_{v \in S \setminus \{v_0\}} \alpha(P'_v) + \sum_{v \in T} \alpha(M'_v) = 0,$$

car $\alpha(P_{v_0}) = 0$ (formule (3.2)) pour tout $\alpha \in B$. Que l'on ait $X_\theta(k_{v_0}) \neq \emptyset$ résulte de l'existence d'une section s_{v_0} de $X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ au-dessus de $U_{0,k_{v_0}}$. On note $P'_{v_0} = s_{v_0}(\theta) \in X_\theta(k_{v_0})$ le point donné par la section. Pour $\alpha \in B$, on a

$$\alpha(P'_{v_0}) = 0$$

puisque $\alpha(s_{v_0}(t)) = 0$.

La k -variété X_θ contient donc les points $P'_v, v \in S$, et les points $M'_v, v \in T$, et pour tout $\alpha \in B$ on a bien la formule (3.4) :

$$\sum_{v \in S} \alpha(P'_v) + \sum_{v \in T} \alpha(M'_v) = 0.$$

Soit maintenant v une place non dans $S \cup T$.

Si l'on a $v(P_i(\theta)) = 0$ pour tout i , alors en v , θ se réduit en un point de $\mathcal{U}_0(F(v))$, qui est image d'un point de $\mathcal{X}_\theta(F(v)) \subset \mathcal{U}(F(v))$. Par lissité et Hensel, ce point se relève en un point $N_v \in \mathcal{X}_\theta(\mathcal{O}_v) \subset \mathcal{U}(\mathcal{O}_v)$. De plus tout élément de B s'annule sur un tel point, car on a $B \subset \text{Br}(\mathcal{U})$.

Supposons $v(P_i(\theta)) > 0$ pour un i (unique car les P_i sont premiers entre eux deux à deux en dehors de S). Alors P_i admet un zéro sur $F(v)$, il existe une place w de k_i au-dessus de v avec $F(w) = F(v)$. Soit $x \in \mathbb{A}_{\mathcal{O}_S}^1$ le point fermé de corps résiduel $F(v)$ associé. On a alors une inclusion ouverte $\mathcal{W}_{i,x} \subset \mathcal{X}_x = \mathcal{X}_{\theta,x}$. La $F(v)$ -variété lisse $\mathcal{W}_{i,x}$ possède un $F(v)$ -point n_v . Ainsi la $F(v)$ -variété $\mathcal{X}_{\theta,x}$ possède le $F(v)$ -point lisse n_v , qui se relève en un \mathcal{O}_v -point N_v du \mathcal{O}_S -schéma lisse \mathcal{X}_θ . \square

On appelle Ω_0 (resp. Ω_i) l'ensemble des places $v \notin S \cup T$ telles que $v(P_i(\theta)) = 0$ pour tout i (resp. telles que $v(P_i(\theta)) > 0$). Pour i fixé, l'ensemble Ω_i contient les places v_i^j . L'ensemble $S \cup T$ (qui contient v_0) et les ensembles $\Omega_i, i = 0, 1, \dots, l$ réalisent une partition de l'ensemble Ω des places de k .

Pour $\alpha \in B$, $v \notin S \cup T$ et $N_v \in \mathcal{X}_\theta(O_v) \subset X(k_v)$ comme dans la démonstration du lemme 3.7, c'est-à-dire relevé d'un point $n_v \in \mathcal{W}_{i,x}(F(v))$, on a la formule [20, Cor. 2.4.3 et pp. 244–245]

$$(3.6) \quad \alpha(N_v) = d_i(v) \partial_{\alpha,i}(F_{i,n_v}) \in \mathbb{Q}/\mathbb{Z},$$

où $\partial_{\alpha,i} \in H^1(\mathcal{W}'_i/\mathcal{W}_i, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = \text{Hom}(\text{Gal}(K'_i/K_i), \mathbb{Q}/\mathbb{Z})$ est le résidu de α au point générique de W_i , où $d_i(v) = v(P_i(\theta))$ et $F_{i,n_v} \in \text{Gal}(K'_i/K_i)$ est le Frobenius en n_v pour le revêtement $\mathcal{W}'_i/\mathcal{W}_i$.

Fixons $i \in \{1, \dots, l\}$. A priori $\sum_{v \in \Omega_i} d_i(v) F_{i,n_v}$ peut être quelconque dans $\text{Gal}(K'_i/K_i)$. Soit f sa classe dans $\text{Gal}(k'_i/k_i)$. Par définition des places w_i^j de k_i , il existe alors $j \in \{1, \dots, s_i\}$ tel que le Frobenius de w_i^j relativement à l'extension k'_i/k_i soit f , et v_i^j est l'unique place de k que divise w_i^j (qui est de degré absolu 1).

D'après le lemme 3.1, on peut alors trouver un point $r_i^j \in \mathcal{W}_i(F(v_i^j)) = \mathcal{W}_i(F(w_i^j))$ dont le Frobenius associé est

$$F_{i,r_i^j} = F_{i,n_{v_i^j}} - \sum_{v \in \Omega_i} d_i(v) F_{i,n_v} \in \text{Gal}(K'_i/K_i).$$

On relève $r_i^j \in \mathcal{W}_i(F(v_i^j)) \subset \mathcal{X}_\theta(F(v_i^j))$ en un point $Q_i \in \mathcal{X}_\theta(O_{v_i^j})$. On a

$$d_i(v_i^j) = v_i^j(P_i(\theta)) = v_i^j(P(\theta_i^j)) = 1.$$

On a alors pour tout $\alpha \in B$:

$$(3.7) \quad \alpha(Q_i) + \sum_{v \in \Omega_i \setminus \{v_i^j\}} \alpha(N_v) = \partial_{\alpha,i}(F_{i,r_i^j} - F_{i,n_{v_i^j}} + \sum_{v \in \Omega_i} d_i(v) F_{i,n_v}) = \partial_{\alpha,i}(0) = 0.$$

Pour chaque $i \in \{1, \dots, l\}$, notons v_i la place v_i^j correspondante, comme ci-dessus. Tout adèle de X_θ de composantes P'_{v_0} en v_0 , $P'_v, v \in S \setminus v_0$, $M'_v, v \in T$, Q_i en v_i et N_v pour $v \in \Omega_i \setminus \{v_i\}$ ($i = 1, \dots, l$), et enfin N_v pour les autres places v est alors dans

$$\prod_{v \in S} X_\theta(k_v) \times \prod_{v \notin S} \mathcal{X}_\theta(O_v)$$

et d'après (3.4) et (3.7) est orthogonal à tout $\alpha \in B$, donc à $\text{Br}X_\theta$ – puisque B se surjecte sur $\text{Br}X_\theta/\text{Br}k$. En outre il appartient à

$$X(k_{v_0}) \times \prod_{v \in S \setminus \{v_0\}} W_v \times \prod_{v \notin S} \mathcal{X}(O_v).$$

Une application de [12, Thm. 3.7] montre qu'il existe un point de $X_\theta(k)$ proche de chacun des $P'_v, v \in S \setminus v_0$, donc dans W_v pour $v \in S \setminus v_0$, et entier en dehors de S sur \mathcal{X}_θ , donc sur \mathcal{X} . Ceci achève la preuve du théorème. \square

Remarque 3.8. — L'hypothèse (iv.a) est satisfaite dans chacun des cas suivants :

- (a) $\text{Br}X/\text{Br}k = 0$; dans ce cas la conclusion du théorème est que X vérifie l'approximation forte en dehors de v_0 .
- (b) $\text{Br}X_{k_{v_0}}/\text{Br}k_{v_0} = 0$;
- (c) La place v_0 est complexe ; dans ce cas l'hypothèse (iii) est toujours satisfaite, car $k_{v_0}(t)$ est alors un corps C_1 par le théorème de Tsen ([18], Th. 6.2.8.).

Nous ne savons pas si le théorème vaut sans l'une des deux hypothèses du point (iv).

Remarque 3.9. — On peut noter que la démonstration ci-dessus est un raffinement de la démonstration du théorème 2 de [22]. Le lemme 3.1 permet de simplifier une partie de cette démonstration en évitant d'avoir à démontrer un analogue (qui d'ailleurs n'est pas clair dans le contexte du présent article) du lemme 4 de [22], qui nécessite l'introduction de classes auxiliaires dans $\text{Br}k(t)$.

D'autre part, on a remplacé l'ensemble infini Σ de places de k et la place appelée v_∞ dans [22] par l'unique place v_0 de l'énoncé ci-dessus.

L'hypothèse d'existence d'une k_{v_0} -section rationnelle permet de contrôler ce qui se passe en la place v_0 ; ceci remplace le travail avec la place v_∞ et l'ensemble infini Σ de [22].

4. L'équation $\sum_{i=0}^2 a_i(t)x_i^2 = p(t)$.

Soit k un corps de caractéristique zéro, \bar{k} une clôture algébrique. Soient $a_i(t), i = 0, 1, 2, 3$ dans $k[t]$. On suppose que les $a_i(t)$ sont premiers entre eux deux à deux.

Soit $Y_0 \subset \mathbb{A}_k^1 \times \mathbb{P}_k^3$ la k -variété définie par

$$\sum_{i=0}^3 a_i(t)x_i^2 = 0.$$

Les point singuliers de Y_0 sont exactement les points dont la coordonnée t est une racine multiple de l'un des $a_i(t)$ et tels que pour cet i , $x_i = 1$ et $x_j = 0$ pour $j \neq i$.

Notons $Y \subset Y_0$ l'ouvert de lissité, complément de ces points.

Soit $Z_0 \subset Y_0$ le fermé défini par $x_3 = 0$. C'est donc la k -variété définie dans $\mathbb{A}_k^1 \times \mathbb{P}_k^2$ par

$$\sum_{i=0}^2 a_i(t)x_i^2 = 0.$$

Les point singuliers de Z_0 sont les points dont la coordonnée t est une racine multiple de l'un des $a_i(t)$ et tels que pour cet i , $x_i = 1$ et $x_j = 0$ pour $j \neq i$. Soit $Z \subset Z_0$ le lieu de lissité. Soit $X \subset \mathbb{A}_k^1 \times \mathbb{P}_k^3$ le lieu de lissité de la variété définie par

$$\sum_{i=0}^2 a_i(t)x_i^2 + a_3(t) = 0.$$

On a donc $Z \subset Y$, et X est le complémentaire de Z dans Y .

L'énoncé suivant généralise [13, Prop. 5.2].

Proposition 4.1. — *Soit X comme ci-dessus. Si le produit des a_i n'est pas un carré dans $\bar{k}[t]$, alors $\mathrm{Br} X / \mathrm{Br} k = 0$.*

Démonstration. — On note $K = \bar{k}(t)$. Comme Y et Z sont lisses, on a la suite exacte :

$$0 \rightarrow \mathrm{Br} \bar{Y} \rightarrow \mathrm{Br} \bar{X} \rightarrow H_{\mathrm{\acute{e}t}}^1(\bar{Z}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}).$$

(cf. [19], III, Cor. 6.2.)

En se restreignant au-dessus de $\mathrm{Spec} K$ et en utilisant le fait que $Z \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ a pour fibre générique une conique lisse et a toutes ses fibres géométriques non vides et de multiplicité 1, on établit

$$H_{\mathrm{\acute{e}t}}^1(\bar{Z}, \mathbb{Q}/\mathbb{Z}) = 0.$$

On a ensuite l'inclusion $\mathrm{Br} \bar{Y} \hookrightarrow \mathrm{Br} Y_K$. La K -variété Y_K est une quadrique projective et lisse de dimension 2 sur $K = \bar{k}(t)$. On conclut $\mathrm{Br} Y_K = 0$. Ainsi $\mathrm{Br} \bar{Y} = 0$ et $\mathrm{Br} \bar{X} = 0$.

Comme le discriminant de la quadrique Y_K n'est pas un carré, on a $\text{Pic } Y_K = \mathbb{Z}$ et $\text{Pic } X_K = 0$. Comme les fibres de $\overline{X} \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ sont intègres, on en déduit $\text{Pic } \overline{X} = 0$.

On vérifie facilement que l'on a $\overline{k}^\times = \overline{k}[X]^\times$. Soit $g = \text{Gal}(\overline{k}/k)$. De la suite exacte

$$\text{Pic } \overline{X}^g \rightarrow H^2(g, \overline{k}[X]^\times) \rightarrow \ker[\text{Br } X \rightarrow \text{Br } \overline{X}] \rightarrow H^1(g, \text{Pic } \overline{X})$$

on déduit

$$\text{Br } k \xrightarrow{\sim} \text{Br } X.$$

□

Le théorème suivant couvre les principaux énoncés du théorème 6.7 de [13].

Théorème 4.2. — *Soit k un corps de nombres. Soient $a_i(t)$ et $p(t)$ dans $k[t]$ des polynômes deux à deux premiers entre eux. Soit X l'ouvert de lissité de la k -variété affine définie dans \mathbb{A}_k^4 par l'équation*

$$\sum_{i=0}^2 a_i(t) x_i^2 = p(t).$$

Supposons $X(\mathbb{A}_k) \neq \emptyset$. Soit v_0 une place de k telle que la forme quadratique diagonale $< a_1(t), a_2(t), a_3(t) >$ ait un zéro sur $k_{v_0}(t)$.

(a) L'image diagonale de $X(k)$ dans la projection de $X(\mathbb{A}_k)^{\text{Br } X}$ sur $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$ est dense.

(b) Si le produit $p(t) \cdot \prod_{i=0}^2 a_i(t)$ n'est pas un carré dans $\overline{k}[t]$, la k -variété X satisfait l'approximation forte hors de v_0 : l'image diagonale de $X(k)$ dans $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$ (adèles hors de v_0) est dense.

Démonstration. — Montrons que les hypothèses (i) à (iv) du théorème 3.4 sont satisfaites.

La fibre générique de $f : X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ est une quadrique affine, espace homogène sous le groupe G_t des spineurs de la forme quadratique diagonale $< a_1(t), a_2(t), a_3(t) >$, les stabilisateurs géométriques étant des tores de dimension 1 (voir [12, §5.6 et §5.8]). On a donc l'hypothèse (i).

L'hypothèse de coprimauté faite sur les $a_i(t)$ et $p(t)$ assure que toutes les fibres de $X \rightarrow \mathbb{A}_k^1$ sont géométriquement intègres, et donc scindées, ce qui donne (ii).

L'hypothèse faite sur la place v_0 implique qu'en tout $t_0 \in k_{v_0}$ où le produit $p(t) \cdot \prod_{i=0}^2 a_i(t)$ n'est pas nul, la forme quadratique $< a_1(t_0), a_2(t_0), a_3(t_0) >$

est isotrope, et ceci garantit que le k_{v_0} -groupe G_{t_0} est isotrope, ce qui donne (iii).

Comme f admet une section rationnelle sur k_{v_0} , elle en admet une aussi sur $L = k_{v_0}^h$ (lemme 3.2). Soit $P_0 \in X(L)$ dont l'image t_0 par f satisfait $p(t_0) \cdot \prod_i a_i(t_0) \neq 0$. Soit R l'anneau local de \mathbb{A}_L^1 en t_0 . Notons $K = L(t)$ le corps des fractions de R . Soit \hat{R} le complété de l'anneau local R et \hat{K} le corps des fractions de \hat{R} .

La restriction X_R/R de f au-dessus de $\text{Spec } R$ est une R -quadrique affine lisse dont la fibre spéciale X_0 possède un L -point. La fibre générique X_η/K est une K -quadrique affine lisse, ouverte dans une K -quadrique projective lisse possédant un K -point. La quadrique X_η/K est donc une K -variété lisse K -rationnelle.

La valuation de R définit une topologie sur \hat{R} , puis sur \hat{K} et enfin sur $X_\eta(\hat{K})$.

La K -rationalité de la K -variété lisse X_η implique que $X_\eta(K)$ est dense dans $X_\eta(\hat{K})$.

Comme X_R est R -lisse, l'application $X_R(\hat{R}) \rightarrow X_0(L)$ est surjective. La fibre d'un point de $X_0(L)$ par cette application est un ouvert de $X_R(\hat{R})$. Comme $X_R(\hat{R}) \subset X_\eta(\hat{K})$ est un ouvert, que $X_\eta(K)$ est dense dans $X_\eta(\hat{K})$, et que

$$X_R(\hat{R}) \cap X_\eta(K) = X_R(R),$$

on conclut que l'application de réduction $X_R(R) \rightarrow X_0(L)$ est surjective.⁽¹⁾ Il existe donc une section rationnelle de f passant par P_0 . La condition (iv.b) du théorème 3.4 est donc satisfaite.

On voit donc que les hypothèses (i) à (iv) du théorème 3.4 sont satisfaites. Ceci établit l'énoncé (a).

L'énoncé (b) résulte alors de la proposition 4.1. \square

Remarque 4.1. — Si v_0 est une place réelle, c'est un théorème de Witt qu'une forme quadratique de rang au moins 3 sur $k_{v_0}(t)$ a un zéro si et seulement si pour presque tout $t_0 \in k_{v_0}$ la forme quadratique spécialisée a un zéro.

1. Dans [9, Exemple 7.2.1], on donne un exemple d'anneau de valuation discrète R obtenu par localisation de $k_v[t]$ en un point rationnel, de corps résiduel $\kappa = k_v$, et d'un R -tore algébrique tel que l'application de réduction $T(R) \rightarrow T(\kappa)$ ne soit pas surjective.

Remarque 4.2. — Dans [13], on considère la k -variété X_0 donnée par l'équation

$$\sum_{i=0}^2 a_i x_i^2 = p(t),$$

avec les $a_i \in k^\times$ et $p(t) \in k[t]$ non nul. Soit X son ouvert de lissité. On autorise le polynôme $p(t)$ à être un carré dans $\bar{k}[t]$. Avec les notations ci-dessus, on établit que l'image diagonale de $X(k)$ dans la projection de l'ensemble de Brauer–Manin $X(\mathbb{A}_k)^{\text{Br} X}$ sur $X(\mathbb{A}_k^{v_0})$ (adèles hors de v_0) est dense. Lorsque $p(t)$ est un carré dans $\bar{k}[t]$, on peut avoir $\text{Br} X / \text{Br} k = \mathbb{Z}/2$. Dans [13, Thm. 6.4, Thm. 6.5], on donne aussi des énoncés pour l'approximation forte sur une résolution non singulière de X_0 , c'est-à-dire une k -variété lisse Z équipée d'un k -morphisme propre et birationnel $Z \rightarrow X_0$. Le théorème principal du présent article permet aussi de traiter ce cas.

Références

- [1] E. Artin et J. Tate, *Class Field Theory*, W. A. Benjamin, New York (1967).
- [2] M. Auslander et A. Brumer, Brauer groups of discrete valuation rings, *Nederl. Akad. Wetensch. Proc. Ser. A* 71=Indag. Math. **30** (1968) 286–296.
- [3] M. Borovoi, Abelianization of the second nonabelian Galois cohomology, *Duke Math. J.* **72**, 1993, 217–239.
- [4] M. Borovoi et C. Demarche, Manin obstruction to strong approximation for homogeneous spaces, à paraître dans *Comment. Math. Helv.*
- [5] S. Bosch, W. Lütkebohmert et M. Raynaud, *Néron Models*, Springer-Verlag, *Ergebnisse der Math. und ihr. Grenzg.*, 3. Folge, **21**, 1990.
- [6] J.W.S. Cassels et J. Fröhlich, *Algebraic Number Theory*, Academic press, London, 1967.
- [7] J.-L. Colliot-Thélène, Points rationnels sur les fibrations, in *Higher Dimensional Varieties and Rational Points*, Bolyai Society Mathematical Series, vol. **12**, Springer-Verlag, 2003, edited by K. J. Böröczky, J. Kollár and T. Szamuely, 171–221.
- [8] J.-L. Colliot-Thélène, Résolutions flasques des groupes linéaires connexes, *J. reine angew. Math. (Crelle)* **618**, 2008, 77–133.
- [9] J.-L. Colliot-Thélène, J.-J. Sansuc, Principal homogeneous spaces under flasque tori : applications, *J. Algebra* **106**, 1987, 148–205.
- [10] J.-L. Colliot-Thélène, R. T. Hoobler et B. Kahn, The Bloch–Ogus–Gabber theorem, in *Algebraic K-theory (Toronto, ON, 1996)*, 31–94, *Fields Inst. Commun.* **16**, Amer. Math. Soc., Providence, RI, 1997.

- [11] J.-L. Colliot-Thélène et B. Kunyavskiĭ, Groupe de Picard et groupe de Brauer des compactifications lisses d'espaces homogènes, *J. Alg. Geom.* **15**, 2006, 733–752.
- [12] J.-L. Colliot-Thélène et F. Xu, Brauer-Manin obstruction for integral points of homogeneous spaces and representations by integral quadratic forms, *Compositio Math.* **145**, 2009, 309–363.
- [13] J.-L. Colliot-Thélène et F. Xu, Strong approximation for the total space of certain quadric fibrations, prépublication, `arXiv:1112.2991v1 [math.NT]`, à paraître dans *Acta Arithmetica*.
- [14] T. Ekedahl, An effective version of Hilbert's irreducibility theorem, in *Séminaire de théorie des nombres de Paris, 1988-1989*, éd. C. Goldstein, *Progress in math.* Birkhäuser vol. **91**, 1990, 241–248.
- [15] M. Florence, Points rationnels sur les espaces homogènes et leurs compactifications, *Transform. Groups* **11**, 2006, 161–176.
- [16] Kazuhiro Fujiwara, A proof of the absolute purity conjecture (after Gabber), in *Algebraic geometry 2000*, Azumino (Hotaka), *Adv. Stud. Pure Math.* **36**, Math. Soc. Japan, Tokyo, 2002, 153–183.
- [17] S. Gille, On the Brauer group of a semisimple algebraic group, *Adv. Math.* **220**, 2009, 913–925.
- [18] P. Gille, T. Szamuely, *Central Simple Algebras and Galois Cohomology*, Cambridge University Press, Cambridge Studies in advanced math. **101**, Cambridge, 2006.
- [19] A. Grothendieck, Le groupe de Brauer, I, II, III, in *Dix exposés sur la cohomologie des schémas*, North Holland & Masson, 1968.
- [20] D. Harari, Méthode des fibrations et obstruction de Manin, *Duke Math. J.* **75**, 1994, 221–260.
- [21] D. Harari, Flèches de spécialisation en cohomologie étale et applications arithmétiques, *Bull. S.M.F.* **125**, 1997, 143–166.
- [22] D. Harari, Spécialisation des conditions de Manin pour les variétés fibrées au-dessus de l'espace projectif, *Compositio Math.* **143**, 2007, 603–617.
- [23] J. S. Milne, *Étale Cohomology*, Princeton University Press, Princ. Math. Ser. **33**, Princeton N.J., 1980.
- [24] G. Prasad, Elementary proof of a theorem of Bruhat–Tits–Rousseau and a theorem of Tits, *Bull. S.M.F.* **110**, 1982, 197–202.
- [25] J.-J. Sansuc, Groupe de Brauer et arithmétique des groupes algébriques linéaires sur un corps de nombres, *J. reine angew. Math. (Crelle)* **327**, 1981, 12–80.
- [26] A. N. Skorobogatov, On the fibration method for proving the Hasse principle and weak approximation, in *Séminaire de théorie des nombres de Paris, 1988-1989*, éd. C. Goldstein, *Progress in math.* Birkhäuser vol. **91**, 1990, 205–219.

24 octobre 2012

JEAN-LOUIS COLLIOT-THÉLÈNE, C.N.R.S., Université Paris Sud, Mathématiques,
Bâtiment 425, 91405 Orsay Cedex, France • *E-mail* : `jltct@math.u-psud.fr`

DAVID HARARI, Université Paris Sud, Mathématiques, Bâtiment 425, 91405 Orsay Cedex,
France • *E-mail* : `David.Harari@math.u-psud.fr`